

## Análise Espaço-sazonal da Qualidade da Água na Zona Flúvio-Marinha do Rio Araguari-Amazônia Oriental-Brasil

Eldo Silva dos Santos<sup>1</sup>, Alan Cavalcanti da Cunha<sup>1</sup>, Elane Domênica de Souza Cunha<sup>2</sup>

santos\_eldo@yahoo.com; elanedsc@yahoo.com.br

Recebido: 11/10/13 - revisado: 20/11/13 - aceito: 07/03/14

### RESUMO

Nesta investigação foram caracterizadas as variações espaciais e sazonais de parâmetros físico-químicos, biológicos e hidrodinâmicos da água em um trecho flúvio-marinho do Rio Araguari (Amazônia Oriental), visando contribuir para o entendimento, gestão e conservação de ecossistemas estuarinos tropicais. Foram realizadas coletas e analisadas amostras de água em sítios compreendidos no trecho entre a foz do rio e a 165 km a montante. As campanhas ocorreram com frequência trimestral durante o ano de 2011. Complementarmente foram quantificados padrões sazonais e espaciais hidrológicos e de marés semidiurnas como fatores de influência da dinâmica da qualidade da água. Uma análise de agrupamentos foi utilizada para identificar padrões de conjuntos espaciais distintos entre sítios da zona próxima da foz e de controle, a 165 km a montante. Observou-se dissimilaridade espacial entre o sítio de controle de montante e os sítios próximos da foz. Contudo, nestes últimos, a forçante hidrológica sazonal foi mais atuante, principalmente na estação seca, sugerindo que a variação da qualidade da água na região estuarina pode ser considerada um gradiente ambiental da influência oceânica, porém limitada a uma zona estuarina de aproximadamente 60 km da foz.

**Palavras-chave:** bacia hidrográfica, monitoramento, análise de conjuntos, estuário, Amapá.

### INTRODUÇÃO

Entender a complexidade dinâmica espaço-sazonal da qualidade da água em estuários é extremamente relevante para a gestão, conservação e manutenção da biodiversidade tropical e dos seus ecossistemas aquáticos (SANTOS, 2012). Por exemplo, a ciclagem de nutrientes em estuários é tão importante que estes são considerados como os mais valiosos ecossistemas ligados às atividades humanas, de acordo com Costanza *et al.* (1997).

Nos estuários da região amazônica há um desafio considerável nesta área porque poucos estudos têm sido desenvolvidos, especialmente quando as forçantes hidrológicas devem ser consideradas em simultaneidade com as variações de parâmetros da qualidade da água (WARD *et al.* 2013).

Por outro lado diversos trabalhos científicos têm sido realizados para avaliar impactos em estuários devido ao uso e ocupação do solo de bacias

hidrográficas (ZHENG *et al.* 2004; BOYER *et al.* 2009; MARKAND *et al.* 2011; DIDONATO *et al.* 2009; TWILLEY *et al.* 1998; CAPO *et al.* 2006; KIM *et al.* 2006; DOMINGUES *et al.* 2007; AZEVEDO *et al.* 2008).

Nestes termos, é fato que os estuários são o exutório de uma bacia hidrográfica, e também uma zona de transição dinâmica entre os ecossistemas fluvial e marinho (PRANDLE, 2009), o que torna a realização do monitoramento espaço-sazonal de parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água uma atividade estratégica altamente relevante para a conservação e gestão destes ecossistemas.

Assim, o monitoramento é uma operação que permite e identifica diversas características específicas relacionadas aos processos dinâmicos naturais e ecológicos, mas também pode ser o principal responsável pela mensuração de potenciais efeitos antrópicos negativos que ocorrem na bacia hidrográfica (SANTOS, 2012).

Por excelência o monitoramento da qualidade da água também é um dos instrumentos usuais da gestão e implantação de políticas públicas voltadas para a área de recursos hídricos, pois permite, entre outras aplicações, a alimentação de dados em modelos de qualidade da água (BÁRBARA *et al.* 2010; BRITO, 2008) que servem de suporte à tomada

<sup>1</sup> - Universidade Federal do Amapá - UNIFAP. Macapá - Amapá.

<sup>2</sup> - Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá - IEPA

de decisão na gestão pública (LUNG, 1993; MARKAND *et al.* 2011), vislumbrando o uso sustentável da bacia (OLSEN *et al.* 2012; MARKAND *et al.* 2011) e a gestão da conservação de ecossistemas aquáticos de modo mais eficiente (LILLEBØ *et al.* 2005; AZEVEDO *et al.* 2008).

Entretanto, empreender estudos de variabilidade espacial e sazonal das condições da qualidade da água em região sob influência da maré normalmente é uma tarefa complexa e custosa devido aos ciclos diurnos ou semidiurnos das marés. Portanto, são essenciais para a adequação, avaliação e previsão correta dos seus efeitos decorrentes das ações impactantes de natureza antrópica em uma bacia hidrográfica (DIDONATO *et al.* 2009).

Apesar de sua evidente relevância, muitas estratégias de conservação de zonas estuarinas amazônicas têm sido difíceis de empreender devido ao desconhecimento de suas características diferenciadas e eminentemente complexas, como é o caso do estuário da bacia hidrográfica do rio Araguari-AP (SANTOS, 2012).

Nesta região do presente estudo localiza-se a Reserva Biológica (REBIO) do Lago Piratuba. A montante desta importante Unidade de Conservação, há diversos empreendimentos potenciais causadores de impactos na bacia e no ecossistema flúvio-marinho. Entre esses empreendimentos destacam-se as usinas hidrelétricas Coaracy Nunes (UHECN, há 40 anos em operação), Ferreira Gomes (UHEFG, início da operação prevista para março de 2014) e Cachoeira Caldeirão (UHECC, início da operação em 2016); as mineradoras (de ferro, ouro e seixo); e a bubalinocultura extensiva (CUNHA *et al.* 2011, CUNHA *et al.* 2013a).

Apesar dos Estudos de Impactos Ambientais (EIAs) elaborados para vários destes empreendimentos, além de alguns estudos específicos no médio trecho do Rio Araguari (BRITO, 2008; BÁRBARA *et al.* 2010; CUNHA *et al.* 2013a; CUNHA *et al.* 2013b), informações relevantes sobre a variação espacial e sazonal da qualidade da água no trecho de jusante destes empreendimentos são praticamente inexistentes (SANTOS, 2012).

Portanto, o presente estudo sobre a variação espacial e temporal da qualidade da água na região estudada permitirá o estabelecimento de uma linha base de avaliação da influência das alterações provocadas por estes empreendimentos e seus respectivos impactos na gestão, conservação e manutenção dos ecossistemas aquáticos e populações ribeirinhas da REBIO e da zona estuarina do Rio Araguari.

Deste modo, o objetivo deste trabalho foi identificar o comportamento da variação sazonal e espacial da qualidade da água em cinco sítios amostrais no trecho de 165 km no Baixo Rio Araguari (Amapá- Amazônia Oriental). Especificamente, avaliou-se os níveis de similaridades entre estes cinco sítios amostrais, considerando também o gradiente da forçante espacial em relação à foz (distância) e o gradiente da forçante sazonal hidrológica (vazão). Assim, foram definidas quatro estações: cheia, seca e as intermediárias (transição), seca-choia e choia-seca. Para quantificar a similaridade ou dissimilaridade entre os sítios amostrais e os distintos períodos sazonais foi utilizada a técnica estatística multivariada denominada análise de agrupamentos (AA).

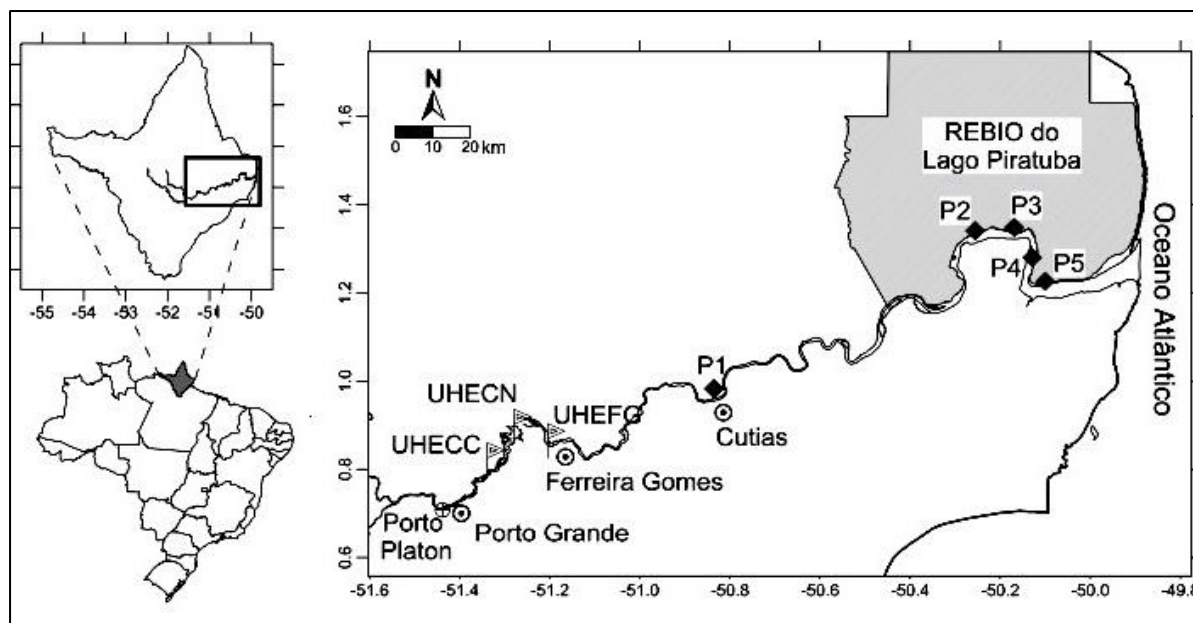
## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de Estudo

A bacia hidrográfica do Rio Araguari apresenta importância ambiental estratégica para o Estado do Amapá, tanto do ponto de vista econômico (geração de energia hidrelétrica), quanto ecológica (Unidades de Conservação). Além disso, detém características geográficas únicas de biomas nela existentes (CUNHA *et al.* 2010) que necessitam de sistemas efetivos de monitoramento para efetivação de seus planos de gestão.

A bacia do Rio Araguari ocupa a área de um terço de toda área territorial do Estado do Amapá. Sua nascente e foz ocorrem em seu território, sendo, portanto exclusiva do Estado do Amapá. Os ecossistemas da bacia variam entre florestas ombrófilas de terra firme, cerrado (savana), áreas alagadas e mangues estuarinos (CUNHA *et al.* 2013b; BRITO, 2008; BÁRBARA, 2010).

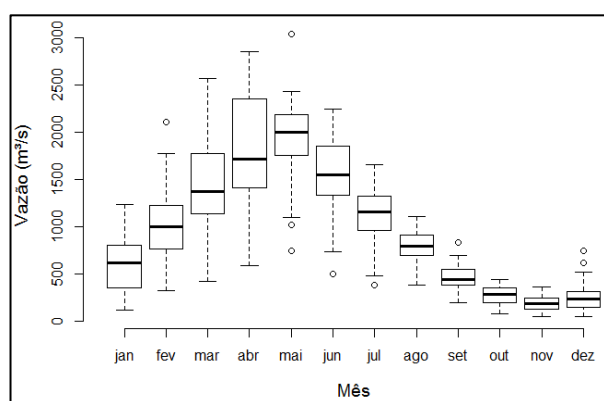
O Rio Araguari apresenta aproximadamente 617km de extensão, nascendo na Serra da Lombada, no Parque Nacional (PARNA) Montanhas do Tumucumaque, e desaguardo no Oceano Atlântico, ligeiramente ao norte da foz do Rio Amazonas. Esta bacia é a maior (exclusivamente) do estado do Amapá/Brasil, com 42.700km<sup>2</sup> de área de drenagem (CUNHA *et al.* 2011) (figura 1). Nela estão contidas Unidades de Conservação (UC) federais, estaduais e áreas indígenas, que equivalem conjuntamente a 31.525km<sup>2</sup>, ou 74% de sua área total. No seu baixo curso, onde foi realizada a presente pesquisa, o Rio Araguari é caracterizado como planície flúvio-marinha (BRITO, 2008; BÁR-



**Figura 1** – Área de estudo compreendendo o trecho flúvio-marinho e sítios amostrais P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub> e P<sub>5</sub>, a jusante dos empreendimentos hidrelétricos UHECC, UHECN e UHEFG.

BARA *et al.* 2010; SILVA, 2011), com baixo declive hidráulico, e gradiente de 0,004m/km (ELETRO-NORTE, 1999).

De acordo com a figura 2, hidrologicamente esses ecossistemas aquáticos apresentam significativas variações sazonais da vazão, as quais se caracterizam como forçantes espaço-sazonais das características físico-químicas (CUNHA *et al.* 2013a) e bióticas do ambiente, influenciando especialmente as estruturas de comunidades de espécies de algas e cianobactérias, bem como sua distribuição e riqueza ao longo do seu curso (CUNHA *et al.* 2013b).



**Figura 2** - Box-plot da série histórica das vazões do Rio Araguaari na estação fluviométrica de Porto Platon (Código ANA 30400000). Registro de jan/1952 a ago/1958 e jun/1972 a dez/2011 (ANA, 2012).

### Amostragem e Medidas de Descarga

Foram utilizados cinco sítios amostrais da qualidade da água no trecho do Baixo Rio Araguaari (figura 1), indicados por P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub> e P<sub>5</sub>, cuja frequência de coleta era trimestral. O procedimento de coleta das amostras de água ocorreu a 50 cm abaixo da superfície do rio. Esta profundidade foi estabelecida pela praticidade e pela limitação dos equipamentos disponíveis. Contudo, na região de estudo, a razão de aspecto (Largura/Profundidade) é maior que 20, podendo ser considerada como de águas rasas (ROSMAN, 2012). Além disso, pela característica dinâmica da região, admite-se mistura constante da coluna d'água pelos efeitos da maré semi-diurna, e a homogeneidade da coluna d'água como representativa da água superficial do rio Araguaari. Todas as coletas ocorreram durante o ano de 2011.

Os parâmetros físico-químicos e microbiológicos analisados foram: temperatura (T), salinidade (sal), cloretos (Cl), condutividade elétrica (CE), turbidez (Turb), cor aparente (Cor), sólidos suspensos totais (SST), sólidos totais dissolvidos (STD), sólidos totais (ST), oxigênio dissolvido (OD), nitrogênio amoniacal (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), coliformes totais (CT), coliformes termotolerantes (E. Coli) e clorofila-a (ChlA). A preparação, coleta e preservação de todas as amostras foram executadas de acordo com APHA (2005).

Os períodos hidrológicos de coleta foram definidos da seguinte forma: transição seca-cheia (SC –março), cheia (C –junho), transição cheia-seca (CS –setembro) e seca (S –dezembro), conforme característica hidroclimática sazonal da região apresentada na figura 2 e de acordo com Cunha *et al.* (2010).

Em resumo, os parâmetros coliformes totais normalmente foram associados com impactos naturais ou antrópicos resultantes da presença ou interação com microrganismos presentes na água ou no solo. Os coliformes termotolerantes, aqui representados pelo parâmetro *E. Coli*, foram associados com poluição fecal recente. A concentração de clorofila-*a* foi utilizada como indicadora de produtividade e condição trófica local (BOYER *et al.* 2009) por estar relacionada com a biomassa de fitoplânctons (GREGOR e MARSÁLEK, 2004, CUNHA *et al.* 2013b; MARKAND *et al.* 2012; LILLEBØ *et al.* 2005; LIU *et al.* 2010; DOMINGUES *et al.* 2007; DIDONATO *et al.* 2009).

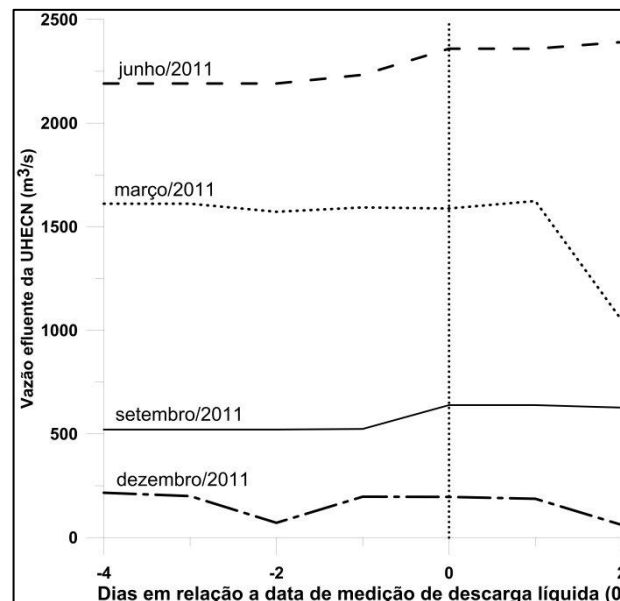
Os resultados das análises físico-químicas e microbiológicas foram comparadas com o estabelecido como padrão de qualidade para rios de classe 2 pela Resolução nº357/2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) (BRASIL, 2005). Como ainda não há enquadramento das águas do Rio Araguari, adotou-se essa classe pois, na área estudada, a água do rio Araguari é predominante doce e atende ao previsto para rios de classe 2, conforme Brasil (2005).

A descarga líquida (vazão) foi obtida pelo método de perfilação acústica doppler (MUSTE *et al.* 2004; DINEHART e BURAU, 2005; MUELLER e WAGNER, 2009; CUNHA *et al.* 2013b). O equipamento utilizado foi o ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), marca RD Instruments, modelo WorkHorse Rio Grande, de 600kHz.

Por limitações logísticas, as medidas de descarga líquida foram realizadas sempre no dia anterior à de coleta de amostras de água, adotando-se este valor de vazão medido como a descarga líquida média de referência para o período de amostragem (SANTOS, 2012). Portanto, considerou-se que, de um dia para o outro, as variações de vazão foram aceitáveis entre os períodos de coleta, o que pode ser observado pela figura 3.

Devido ao risco da presença de bancos de areias nas campanhas de setembro e dezembro, quando normalmente ocorre significativa redução da vazão do Rio Araguari (figura 2), foram utilizadas 3 seções de medição de descarga líquida: a primeira, a 49 km da foz do rio (nas campanhas de março e junho/2011), a segunda, a 54 km (em setem-

bro/2011) e a terceira, a 59 km (dezembro/2011). Portanto, a distância máxima entre as três seções de medida não ultrapassou 10 km, sendo consideradas como toleráveis entre as suas diferenças.



**Figura 3 - Variação vazão efluente da UHECN entre 4 dias anteriores à medição de descarga líquida (-4) e 2 dias após a medição (2).**

Cada medição de descarga líquida ocorreu durante 12,5h, que corresponde a aproximadamente um ciclo completo de maré semidiurna. Procedeu-se com a integração numérica do gráfico discreto vazão *versus* tempo, que resultou no volume de água escoado na seção de medição. A vazão média foi calculada pela divisão do volume pelo tempo total de medição, ou seja, 12,5h.

#### Análise de Agrupamentos (AA)

A análise de agrupamentos foi a técnica de classificação escolhida e elaborada para agrupar os conjuntos de dados de acordo com as similaridades existentes entre sítios e períodos amostrais (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012).

A análise de agrupamentos é um método que compara um conjunto de dados de uma amostra e os agrupa por relações de similaridades (MCKENNA, 2003). Na análise de agrupamentos foram utilizados quatorze variáveis, classificadas como parâmetros físico-químicos e microbiológicos, além da vazão e do gradiente distância em relação à foz. Estes procedimentos seguiram as recomendações de Tan *et al.* (2006) e Mckenna (2003).

A análise de agrupamentos resultou em um dendograma que apresenta visualmente o processo de agrupamento e o grau de similaridade existente entre os sítios de coleta estudados ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  e  $P_5$ ). Esta técnica reduziu drasticamente a dimensão dos dados originais e facilitou o entendimento sobre como estes parâmetros se agrupam (TAN *et al.* 2006). No referido procedimento foi usado o método de Ward, com distância Euclidiana como medida de similaridade na análise de agrupamentos, segundo as recomendações de Kazi *et al.* (2009).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização físico-química e microbiológica da qualidade da água

O trecho flúvio-marinho estudado apresentou, em linhas gerais, resultados de qualidade da água que refletem um bom estado de conservação em face aos parâmetros físico-químicos e microbiológicos analisados em todos os períodos sazonais. Assim, os valores obtidos estavam em conformidade com os previstos pela legislação (BRASIL, 2005) (figuras 4 e 5).

Nas figuras 4 e 5 o intervalo em cada sítio amostral equivale ao erro padrão. As linhas horizontais tracejadas correspondem aos limites da legislação existentes para água doce de classe II (BRASIL, 2005), quando houver.

A concentração de clorofila-*a* apresentou resultados que variaram entre 1,68 e 10,49  $\mu\text{g/L}$ , indicando características de ecossistemas aquáticos oligotróficos, similares aos obtidos no alto e médio cursos (CUNHA *et al.* 2013b). Esse resultado também está de acordo com os obtidos em estudos similares anteriores realizados em trechos a jusante do presente estudo (DIAS, 2007; BRITO, 2008; BÁRBARA *et al.* 2010; CUNHA *et al.* 2011).

Em relação aos parâmetros físico-químicos, o oxigênio dissolvido (OD) apresentou, em três sítios ao longo do ano (variação sazonal), valores abaixo do limite de 5  $\text{mg/L}$  (BRASIL, 2005). Este fato ocorreu em março/11 e durante a campanha de junho/11. Em ambos os períodos, o sítio  $P_3$  apresentou os valores mais baixos para este parâmetro. Nesses períodos as vazões medidas foram próximas e absolutamente as mais altas de todas as séries amostrais. Nos estudos de Brito (2008), Bárbara *et al.*

(2010) e Cunha (2012) os valores de OD medidos no Rio Araguaari no trecho entre o sítio  $P_1$  deste estudo, e 160 km a jusante (foz), foram sempre maiores que 5  $\text{mg/L}$ , frequentemente alcançando níveis próximos à saturação na temperatura ambiente.

Uma diferença expressiva entre este estudo e os dos autores citados anteriormente é que no trecho do Alto e, principalmente, Médio Araguaari, devido às quedas e correntezas, a taxa de reaeração da água do rio tende a ser maior, uma vez que esses acidentes geomorfológicos atuam como reaeradores naturais do rio (CUNHA *et al.* 2013). Porém, no Baixo Araguaari, por se caracterizar como uma planície de inundação influenciada por maré (DIAS, 2007), o rio flui sem evidentes acidentes hidráulicos, o que tende a reduzir a taxa de troca de oxigênio causada pela turbulência interfacial ar-água (CUNHA *et al.* 2011). Por outro lado, no baixo trecho, a turbulência parece ser suficientemente elevada para provocar ressuspensão de sólidos e, portanto, aumento potencial da DBO disponível no sedimento (bentônica). Então, este resultado configura-se potencialmente em consumo de OD que explicaria os baixos valores da DBO naqueles períodos no sítio  $P_3$ , os quais se somariam a carga de nutrientes oriunda dos solos lixiviados pelas chuvas do período.

Outra observação importante é que a forte vento também interfere no controle da transferência de oxigênio da atmosfera para a água do rio. Durante o período seco, com mais altas temperaturas, ocorre aumento da ação dos ventos (alísios), mas que é negativamente compensado pela diminuição da vazão (turbulência) e das cargas oriundas da bacia de drenagem. Portanto, a ação dos ventos incidentes de grandes sistemas de circulação atmosférica na região (alísios) (CUNHA *et al.* 2010) tende a alterar a taxa de reoxigenação quando comparado somente aos efeitos turbulentos devidos do escoamento natural da corrente. Porém, é necessária uma pesquisa específica para testar essa hipótese.

A cor aparente inclui também a matéria em suspensão e, portanto, é natural que esta seja maior que a primeira. Outra consideração importante é que alguns rios amazônicos são naturalmente ricos em matéria orgânica e substâncias húmicas que empregam coloração marrom avermelhada à água (VIANA, 2002; JUNK *et al.* 2011). Além disso, na Bacia do Rio Araguaari ocorre intensa atividade de exploração mineral, especialmente ferro e manga-

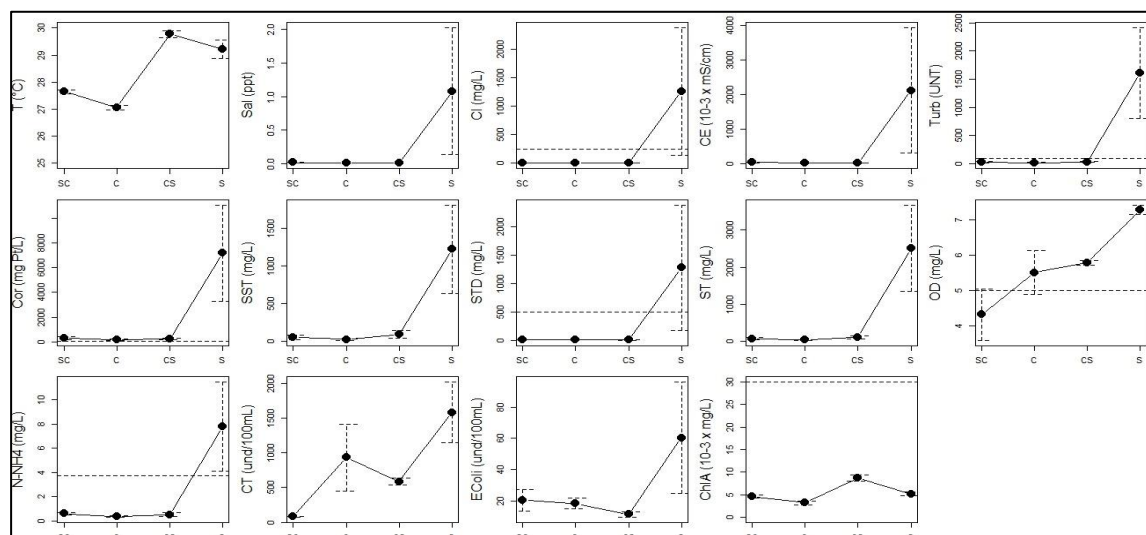


Figura 4 - Variação sazonal dos parâmetros da qualidade da água analisados no período de coleta de 2011. SC = transição seca-cheia (março), C = cheia (junho), CS = transição cheia-seca (setembro) e S = seca (dezembro).

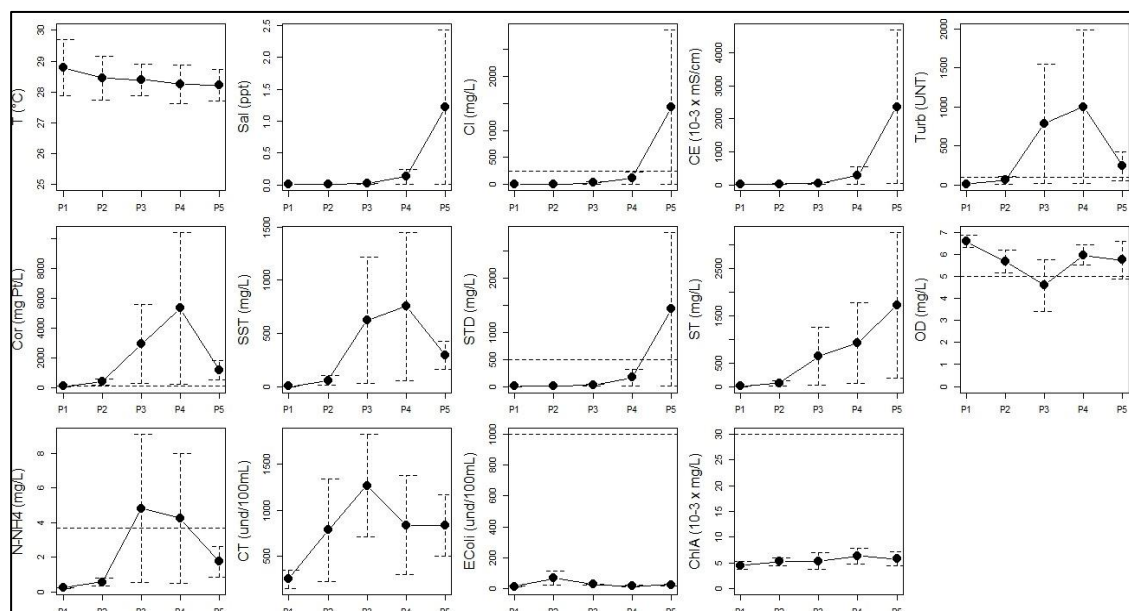


Figura 5 - Variação espacial dos parâmetros de qualidade da água por sítio amostragem da qualidade da água.

nês, que são dois dos principais constituintes de coloração da água destes ambientes (Brito, 2008). Todos esses fatores colaboram para os altos valores medidos do parâmetro cor.

Em relação às concentrações de sólidos totais, os valores foram significativamente elevados, comparadas com pesquisas anteriores no Baixo Araguari (BRITO, 2008, BÁRBARA *et al.* 2010, CUNHA *et al.* 2013b). A causa mais provável é o transporte de material oriundo de interações entre a planície e o

ecossistema aquático costeiro, principalmente durante os períodos de inundação. Uma segunda causa provável seria decorrente de processos erosivos provocados naturalmente e pela bubalinocultura extensiva (BÁRBARA *et al.* 2010; BRITO, 2008), interferência de barragens em série (CUNHA *et al.* 2013a) e principalmente pelo revolvimento do leito por erosão das margens e fundo devido ao fenômeno da pororoca que pode ocorrer até duas vezes por dia no trecho estudado (SANTOS, 2012).

Analisando-se a estação seca, as figuras 4 e 5 apresentam um comportamento singular da concentração de sólidos quando comparado às demais, em consequência da menor interferência hidrológica de montante (menor diluição) e provavelmente maior atuação das forçantes oceânicas de jusante (SANTOS, 2012).

Em outras palavras, neste último caso, foi possível também interpretar as altíssimas variações da concentração de sólidos provavelmente por diminuição significativa da vazão de montante (sazonalidade hidrológica), em simultaneidade com o "aumento" relativo da influência de marés oceânicas que continuam erodindo e revolvendo as margens e fundo do leito do rio (figura 2).

Observou-se, também, que neste período houve elevação da concentração da maioria dos parâmetros da qualidade da água, principalmente os relacionados com os sedimentos (STD, turbidez, cor, SST ST), intrusão salina (condutividade elétrica, salinidade e cloretos). Uma segunda explicação é que as águas oceânicas tendem a forçar com mais intensidade seus efeitos no sentido de jusante para montante, superando com facilidade a resistência da barreira hídrico-fluvial de montante.

Com efeito, a salinidade medida nos sítios P<sub>4</sub> e, especialmente P<sub>5</sub>, no período seco, apresentou valor elevado em comparação com os demais sítios, porque foram coletados em períodos de maré enchente, após a passagem da onda da "pororoca" no sentido oceano-rio.

Ainda em relação à ressuspensão de sedimentos, nas seções de análises mais rasas próximas da foz, no período seco, os ventos também podem ter apresentado alguma influência, a exemplo de efeitos semelhantes estudados no mar Salton por Chung *et al.* (2009). Porém há necessidade de uma investigação sobre a influência dos ventos nesta área de estudo.

No período seco, o nitrogênio amoniacal apresentou alta correlação (entre 0,78 e 0,97,  $p < 0,01$ ) com os parâmetros SST, STD, ST, Cor, Sal e Turb, de acordo com teste de correlação de Spearman (BOCARD *et al.* 2011) aplicado. Tais resultados foram semelhantes aos de Rocha *et al.* (1995) e de Lillebø *et al.* (2005).

Analisando-se os parâmetros microbiológicos (CT, EColi e ChlA) e comparando-os com os limites legais descritos por Brasil (2005), observou-se nas figuras 4 e 5 que em nenhuma das amostras, em qualquer um dos períodos sazonais de coleta, a qua-

lidade microbiológica da água se apresentou em não conformidade. Este resultado era esperado devido a baixa ocupação humana da bacia no trecho de jusante e à alta capacidade de diluição do rio Araguari, como já observado por Brito (2008), Bárbara *et al.* (2010) e Cunha *et al.* (2011). Esses autores identificaram uma relação positiva entre a diminuição da concentração dos parâmetros microbiológicos com o aumento do poder de autodepuração do Rio Araguari, em especial a jusante de barragem da UHCN, apesar da crescente intensificação da bubalinocultura neste trecho nos últimos anos.

### Análise de agrupamentos (AA)

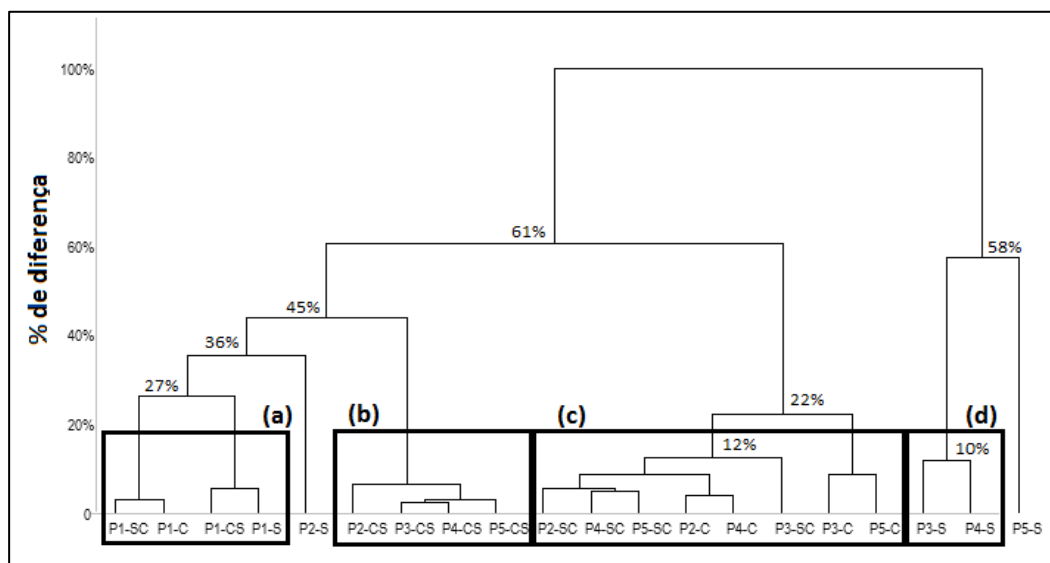
A análise de agrupamentos (AA) forneceu informações relevantes sobre a estrutura das variáveis físico-químicas e microbiológicas da água no trecho flúvio-marinho, disponibilizando o nível de similaridade entre sítios e períodos de coleta estudados (figura 6).

A partir da análise de agrupamentos foi elaborado o dendograma apresentado na figura 6, no qual se observou agrupamento de 4 conjuntos distintos, com grau de similaridade próximos de 73% entre si. Por esse critério, dois sítios, cujas amostras foram coletadas no período seco, não foram classificados em nenhum dos grupos: P<sub>2</sub>S e P<sub>5</sub>S, a esquerda e no extremo direito do gráfico, apresentando-se como distintos em relação aos demais.

O grupo (a) foi formado por todos os eventos de coletas realizadas no sítio amostral P<sub>1</sub>, independente do período do ano. Esse resultado mostrou que P<sub>1</sub> se diferenciou significativamente dos demais e que as características da qualidade da água na zona estritamente estuarina podem ser consideradas diferenciadas do trecho fluvial restante mais a jusante e próximo da foz. Nesse caso, o fator espacial parece preponderar sobre os efeitos sazonais.

Os resultados das análises para os sítios na região do estuário próximos da foz, no mês de setembro/11 (período intermediário cheia-seca), se aglomeraram no grupo (b), com nível de semelhança maior que 90%. O grupo (c) formou-se por eventos amostrais de coleta no estuário nos períodos intermediário seca-chaia (março/11) e cheia. Nestes grupos, observou-se a relativa importância da sazonalidade na variação da qualidade da água, promovendo certa homogeneidade de suas propriedades físico-químicas e microbiológicas em todo o trecho estudado.





**Figura 6 - Dendrograma com 4 grupos: (a) grupo com sítio em frente à foz de Cutias ( $P_1$ ) em todos os trimestres medidos, (b) sítios da zona estuarina no período de transição cheia-seca, (c) sítios dos períodos de transição seca-cheia e de cheia e (d) sítios próximos à foz no período seco.**

Ressalta-se que esses dois períodos, apesar do intercurso temporal de um ano entre si, apresentaram vazões aproximadas, 2367 e 2540 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. Este fato confirma a hipótese de que a vazão é uma forçante sazonal física da mais alta importância na caracterização da qualidade da água na região próxima da foz e da REBIO. Neste aspecto, necessita ser mensurada e estudada em conjunto com a qualidade da água com maior profundidade (SANTOS, 2012).

O quarto grupo mostrado no dendrograma da figura 6 foi formado apenas isoladamente pelos sítios  $P_2$  e  $P_5$  no período seco. Estes sítios, no período seco (dezembro/11), apresentaram características distintas dentre os demais grupos avaliados. O sítio  $P_2$ , neste período, apresentou maior similaridade com os sítios  $P_1$  (grupo a) e o sítio  $P_5$  em relação aos  $P_3$  e  $P_4$  no mesmo período de coleta. Neste último caso, porém, a similaridade foi de apenas 42%.

Em resumo, na análise de agrupamentos foram identificadas diferenças significativas entre os sítios amostrais espacialmente distribuídos na foz e na seção de controle de Cutias, 165 km a montante da foz. Esta observação indicou que a sazonalidade é uma forçante física efetiva que influencia todo o ciclo hidrológico, sendo este último um fator importante na representação das similaridades da qualidade da água entre os sítios de coleta. Portanto, os resultados da variação da qualidade da água no período sazonal hidrológico são efetivamente influen-

ciáveis e relevantes para as estratégias de monitoramento. Desconsiderar estes fatores pode resultar em erros metodológicos e de procedimentos para tomadas de decisão na gestão deste trecho da bacia.

Uma das principais consequências positivas do entendimento destes mecanismos envolvendo as forçantes espaço-sazonais sobre a qualidade da água neste trecho estuarino seria reduzir o número de sítios amostrais e os custos de monitoramento. Isto permitiria a otimização da frequência de coletas, especialmente nos sítios próximos da foz, mesmo em face de sua dinâmica de marés semi-diurnas. Estas informações são fundamentais como passo inicial de redução tanto de custos de monitoramento e esforço logístico em local pouco acessível.

Este procedimento, assim, possibilita uma melhor eficiência na estratégia de gestão de bacias (LUNG, 1993), além de produzir ganhos econômicos significativos ao sistema de monitoramento da qualidade da água, otimizando todo seu processo de avaliação (WEISSENBERGER *et al.* 2010).

Finalmente, o resultado da análise de agrupamentos permitiu inferir que o trecho estuarino ou flúvio-marinho, especialmente entre os sítios amostrais  $P_2$  e  $P_5$ , deve ser entendido conceitualmente como uma *zona de mistura dinâmica* diferenciada dos trechos flúvio-marinhos de montante. As evidentes variações espaço-sazonais da qualidade da água, quantificadas pela AA, sugerem que os ecossistemas aquáticos estuarinos próximos da foz são significati-



vamente mais complexos e dinâmicos que os seus trechos mais a montante da bacia hidrográfica e devem ser monitorados de modo diferenciado.

## CONCLUSÃO

Esta investigação tratou da análise da dinâmica da qualidade da água no baixo Rio Araguari, cujo foco principal foi a sua variação espaço-sazonal num trecho de 165 km do Rio Araguari (Amazônia Oriental-Brasil). As principais conclusões da pesquisa foram:

1. De acordo com AA, na região estuarina, correspondente aos 60 km mais próximos da foz ( $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  e  $P_5$ ), a sazonalidade provocou diferenças mais evidentes da qualidade da água, sendo o fator mais relevante e que melhor explicou suas variações, em detrimento dos gradientes espaciais (distâncias entre sítios amostrais);
2. O sítio de amostragem de referência,  $P_1$ , distante 165 km da foz, apresentou comportamento altamente diferenciado em relação aos demais sítios amostrais, como os próximos do trecho estuarino (60 km da foz -  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  e  $P_5$ ). Portanto, para o sítio  $P_1$ , o efeito espacial foi mais relevante que a sazonalidade na qualidade da água.
3. Confirmou-se a hipótese de que as forçantes das marés semidiurnas oceânicas são limitadas e evidenciadas somente na região próxima da foz do rio, a qual restringiu a um trecho longitudinal de 60-80 km, que correspondeu a metade da área analisada neste estudo. A esta zona foi denominada *zona de mistura dinâmica*, sobre a qual se sugere abordagem diferenciada de monitoramento e gestão. As evidências experimentais indicam que este trecho parece ser mais homogêneo em relação às variações da qualidade da água devido aos constantes efeitos de "mistura" causados pelas marés oceânicas - além dos efeitos da pororoca, sendo estes mais expressivos durante o período seco.
4. Os atuais efeitos deletérios de uso e ocupação do solo em todo o trecho do Baixo Rio Araguari, de modo geral, apresentaram-se aparentemente ainda pouco intensivos sobre os parâmetros de qualidade da água, comparando-se com padrões de classificação de corpos d'água de Classe 2 (CONA-

MA 357/2005). No entanto, no período seco, alguns parâmetros, em alguns sítios, extrapolaram os valores máximos preconizados pela Lei, mostrando alguns sinais de perturbações "naturais" ou antropogênicas neste trecho da bacia hidrográfica, o que requer no futuro novos aprofundamentos no tema para sua confirmação.

Portanto, há ainda a necessidade de se estender investigações desta natureza nesses ecossistemas, para se obter uma melhor compreensão de seu funcionamento. Assim, talvez seja possível compreender as importantes conexões entre os fatores físicos, químicos e biológicos, e mesmo os antrópicos, nesses ambientes, considerando a perspectiva da variação da qualidade da água e os ciclos hidrológicos amazônicos, em especial aqueles sujeitos aos fenômenos extremos, como as tendências previstas de mudanças climáticas globais. Esse cenário desafia o atual nível de conhecimento sobre a importância do monitoramento para a gestão e conservação da biodiversidade tropical e dos recursos hídricos na região do estudo.

## REFERÊNCIAS

- ANA, 2012. Agência Nacional de Águas –Hidroweb. URL <http://hidroweb.ana.gov.br/>.
- APHA (American Public Health Association), 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water*, 22th ed. APHA-AWWA-WPCF, Washington, DC.
- AZEVEDO, I. C; DUARTE, P. M; BORDALO, A. A. 2008. *Understanding spatial and temporal dynamics of key environmental characteristics in a meso-tidal Atlantic estuary (Douro, NW Portugal)*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 76, 620-633.
- BÁRBARA, V. F; CUNHA, A. C; RODRIGUES, A. S. L, SIQUEIRA, E. Q. 2010. *Monitoramento sazonal da qualidade da água do rio Araguari - AP*. Revista Biociências 16, 57-72.
- BORCARD, D; GILLET, F; LEGENDRE, P. 2011. *Numerical Ecology with R*. Springer, New York.
- BOYER, J. N; KELBLE, C. R; ORTNER, P. B; RUDNICK, D. T. 2009. *Phytoplankton bloom status: Chlorophyll a biomass as an indicator of water quality condition in the southern estuaries of Florida, USA*. Ecological Indicators 9, S56-S67.

BRASIL, 2005. *Resolução CONAMA nº357 - Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.*

BRITO, D. C. 2008. *Aplicação do Sistema de Modelagem da Qualidade da Água QUAL2Kw em Grandes Rios: O Caso do Alto e Médio Araguari –AP.* Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical da Universidade Federal do Amapá. Amapá-AP.

CAPO, S; SOTTOLICHIO, A; BRENON, I; CASTAING, P; FERRY, L. 2006. *Morphology, hydrography and sediment dynamics in a mangrove estuary: The Konkoure Estuary, Guinea.* Marine Geology 230, 199-215.

CHUNG, E. G; BOMBARDELLI, F. A; SCHLADOW, S. G. 2009. *Modeling linkages between sediment resuspension and water quality in a shallow, eutrophic, wind-exposed lake.* Ecological Modelling, 220, 1251-1265.

COSTANZA, R; ARGE, R; GROOT, R. D; FARBERK, S; GRASSO, M; HANNON, B; LIMBURG, K; NAEEM, S; NEILL, R. V. O; PARUELO, J; RASKIN, R. G; SUTTONKK, P. 1997. *The value of the world's ecosystem services and natural capital.* Nature 387, 253-260.

CUNHA, A. C; BRITO, A. U; PINHEIRO, L. A. R; CUNHA, H. F. A; BRASIL-JR, A. C. P. 2010. *Simulação da hidrodinâmica e avaliação do potencial hidrocinético: Estudo da Foz do Rio Matapi no Baixo Rio Amazonas - Amapá/Brasil.* Revista Brasileira de Energia Solar (RBENS) 1, 139-148.

CUNHA, A. C; BRITO, D. C; CUNHA, H. F. A; SCHULZ, H. E. 2011. *Dam Effect on Stream Reaeration Evaluated with QUAL2KW Model: Case Study of the Araguari River, Amazon Region, Amapá State/Brazil.* In: Billibio, C., Hensel, O., Selbach, J. (Eds.), Sustainable Water Management in the Tropics and Subtropics –And Case Studies in Brazil. Fundação Universidade Federal do Pampa, Jaguarão/RS, p. 697.

CUNHA, A. C; BRITO, D. C, BRASIL JUNIOR, A. C. P; PINHEIRO, L. A. R; CUNHA, H. F. A; SANTOS, E. S; KRUSCHE, A. V. 2012. *Challenges and Solutions for Hydrodynamic and Water Quality in Rivers in the Amazon Basin.* IN: SCHULZ, H. E; SIMÕES, A. L. A; LOBOSCO, R. J. (Eds.). In: Hydrodynamics - Natural Water Bodies. InTech, Rijeka/Croácia, pp. 67-88.

CUNHA, A.C; PINHEIRO, L. A. R; CUNHA, H. F. A, 2013, *Modelagem e simulação do escoamento e dispersão sazonais de agentes passivos no rio Araguari-AP: cenários para o AHE Ferreira Gomes-I- Amapá/Brasil.* Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH). Vol 18, N.1. Jan/Mar. 2013.

CUNHA, A. C; SOUZA, E. B; CUNHA, H. F. A. 2010. *Tempo, Clima e Recursos Hídricos - Resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá, 1ªed.* IEPA, Macapá/AP.

CUNHA, E. D. S; CUNHA, A. C; SILVEIRA JR, A. M; FAUSTINO, S. M. M. 2013. *Phytoplankton of two rivers in the eastern Amazon: characterization of biodiversity and new occurrences.* Acta Botanica Brasilica, 27 (2), <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-3062013000200011>.

DIAS, M. B. 2007. *Composição e abundância do fitoplâncton do sudoeste da Reserva Biológica do Lago Piratuba (Amapá, Brasil).* Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas da Universidade Federal do Amazonas.Amazonas.

DIDONATO, G.T; STEWART, J. R; SANGER, D. M; ROBINSON, B. J; THOMPSON, B. C; HOLLAND, A. F; VAN DOLAH, R. F. 2009. *Effects of changing land use on the microbial water quality of tidal creeks.* Marine Pollution Bulletin 58, 97-106.

DINEHART, R.L; BURAU, J. R. 2005. *Repeated surveys by acoustic Doppler current profiler for flow and sediment dynamics in a tidal river.* Journal of Hydrology 314, 1-21.

DOMINGUES, R. B; SOBRINO, C; GALVÃO, H. 2007. *Impact of reservoir filling on phytoplankton succession and cyanobacteria blooms in a temperate estuary.* Estuarine, Coastal and Shelf Science 74, 31-43.

ELETRONORTE, 1999. *Estudos De Inventário Hidrelétrico – Bacia Hidrográfica do Rio Araguari –Estado do Amapá-Relatório Final.*

GREGOR, J. E; MARSÁLEK, B. 2004. *Freshwater phytoplankton quantification by chlorophyll a: a comparative study of in vitro, in vivo and in situ methods.* Water Research 38, 517-522.

JUNK, W. J; PIEDADE, M. T. F, SCHÖNGART, J; COHNHAFT, M; ADENEY, J. M; WITTMANN, F. 2011. *A Classification of Major Naturally-Occurring Amazonian Lowland Wetlands.* Wetlands 31, 623-640.

KAZI, T. G; ARAIN, M. B; JAMALI, M. K; JALBANI, N; AFRIDI, H. I; SARFRAZ, R. A; BAIG, J. A; SHAH, A. Q. 2009. *Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: a case study.* Ecotoxicology and environmental safety 72, 301-309.

KIM, T. I; CHOI, B. H; LEE, S. W. 2006. *Hydrodynamics and sedimentation induced by large-scale coastal developments in the Keum River Estuary, Korea.* Estuarine, Coastal and Shelf Science 68, 515-528.

- LILLEBØ, A. I.; NETO, J. M.; MARTINS, I.; VERDELHOS, T.; LESTON, S.; CARDOSO, P. G.; FERREIRA, S. M.; MARQUES, J. C.; PARDAL, M. A. 2005. *Management of a shallow temperate estuary to control eutrophication: The effect of hydrodynamics on the system's nutrient loading*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 65, 697-707.
- LIU, Y.; GUO, H.; YANG, P. 2010. *Exploring the influence of lake water chemistry on chlorophyll a: A multivariate statistical model analysis*. Ecological Modelling 221, 681-688.
- LUNG, W. S. 1993. *Water Quality Modeling. Volume III: Application to Estuaries*, 1st ed. CRC Press, Florida.
- MARKAND, S.; BACHOON, D. S.; GENTIT, L.; SHERCHAN, S.; GATES, K. 2011. *Evaluation of physical, chemical and microbiological parameters of water quality in the Harris Neck estuarine marshes along the Georgia coast*. Marine Pollution Bulletin 62, 178-181.
- MCKENNA, J. 2003. *An enhanced cluster analysis program with bootstrap significance testing for ecological community analysis*. Environmental Modelling & Software 18, 205-220.
- MUELLER, D. S.; WAGNER, C. R. 2009. *Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat*. In: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 3A-22. Virginia, p. 72.
- MUSTE, M.; YU, K.; SPASOJEVIC, M. 2004. *Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements*. Flow Measurement and Instrumentation 15, 1-16.
- OLSEN, R. L.; CHAPPELL, R. W.; LOFTIS, J. C. 2012. *Water quality sample collection, data treatment and results presentation for principal components analysis - literature review and Illinois River watershed case study*. Water Research 46, 3110-22.
- PRANDLE, D. 2009. *Estuaries - dynamics, mixing, sedimentation and morphology*, 1st ed. Cambridge University Press, Cambridge.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria.
- ROCHA, C.; CABEÇADAS, G.; BROGUEIRA, M. J. 1995. *On the importance of sediment-water exchange processes of ammonia to primary production in shallow areas of the Sado estuary (Portugal)*. Netherlands Journal of Aquatic Ecology 29, 265-273.
- ROSMAN (2012): ROSMAN, P.C.C. Referência Técnica do SisBaHIA. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro-RJ. 2012.
- SANTOS, E. S. 2012. *Modelagem Hidrodinâmica e Qualidade da Água em Região de Pororoca na Foz do Rio Araguari-AP*. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical da Universidade Federal do Amapá). Amapá
- SILVA, W.C., 2011. Viabilidade econômica do pagamento por serviços ambientais no Estado do Amapá. Dissertação (Mestrado em Direito Ambiental e Políticas Públicas da Universidade Federal do Amapá). Amapá
- TAN, P. N.; STEINBACH, M.; KUMAR, V. 2006. *Cluster Analysis: Basic Concepts and Algorithms*. In: Introduction to Data Mining. Addison-Wesley, p. 769.
- TWILLEY, R. R.; GOTTFRIED, R.; RIVERA-MONROY, V.H.; ZHANG, W.; MONTAÑO ARMIJOS; M.; BODERO, A. 1998. *An approach and preliminary model of integrating ecological and economic constraints of environmental quality in the Guayas River estuary, Ecuador*. Environmental Science & Policy 1, 271-288.
- VIANA, J. P. 2002. *Physical and chemical post-dam alterations in the Jamari River, a hidroelectric-developed river of the Brazilian Amazon*. Hydrobiologia 472, 235-247.
- WARD, N. D.; KEIL, R. G.; MEDEIROS, P. M.; BRITO, D. C.; CUNHA, A. C.; DITTMAR, T.; YAGER, P. L.; KRUSCHE, A. V.; RICHEY, J. E. 2013. *Degradation of terrestrially derived macromolecules in the Amazon River*. Nature Geoscience (Print), v. 19, p. 1-8. May. DOI: 10.1038/NGEO1817
- WEISSENBERGER, S.; LUCOTTE, M.; HOUEL, S.; SOUMIS, N.; DUCHEMIN, E.; CANUEL, R. 2010. *Modeling the carbon dynamics of the La Grande hydroelectric complex in northern Quebec*. Ecological Modelling 221, 610-620.
- ZHENG, L.; CHEN, C.; ZHANG, F. Y. 2004. *Development of water quality model in the Satilla River Estuary, Georgia*. Ecological Modelling 178, 457-482.

### Seasonal And Spatial Analysis Of Water Quality In The Estuarine Zone Of Araguari River-Eastern Amazon-Brazil

#### ABSTRACT

The objective of the investigation was to characterize seasonal and spatial variations of physical-chemical, biological and hydrodynamic water parameters in a tidal section of the Araguari River (Eastern Amazonia). There-

*fore, its importance lies in understanding and being useful for the management and conservation of tropical ecosystems. The methodology consisted in analysis of water samples from five sites in the section between the mouth and 165 km upstream. In addition, seasonal and spatial hydrological patterns were quantified and semidiurnal tides were evaluated as factors influencing the dynamics of water quality. A cluster analysis identified distinct patterns of spatial clustering among sites in the area close to the mouth and control site, 165 km upstream from the mouth. Spatial dissimilarity was observed between the upstream control site and sites near the mouth, but in these, the seasonal hydrological forcing was more important, especially during the dry season, suggesting that the water quality in the estuary stretch can be considered as representative of the environmental gradient of oceanic influence, though limited to the estuarine zone of approximately 60 km from the mouth.*

**Key-words:** watershed, monitoring, cluster analysis, estuary, Amapá